

---

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ**

---

УДК 621.311.68

**В.В. Прокопенко**, к.т.н., доцент, **О.А. Босенко**, студент (НТУУ «КПІ»)

---

**АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ  
НА ПРИКЛАДІ СУЧАСНИХ ОФІСНИХ БУДІВЕЛЬ**

---

**V.V. Prokopenko, O.A. Bosenko** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

---

**ANALYSIS OF POWER QUALITY IN CASE OF MODERN OFFICE  
BUILDINGS.**

---

*В статті розглянуто питання якості електроенергії в мережах офісних будівель. Проведені дослідження показали, що нелінійні споживачі досить сильно спотворюють форми кривих струму і напруги. Також був розглянутий вплив вищих гармонік на мережу.*

**Ключові слова:** *якість електроенергії; нелінійне навантаження; несиметрія; вищі гармоніки; коефіцієнт спотворення.*

*В статье рассмотрены вопросы качества электроэнергии в сетях офисных зданий. Проведенные исследования показали, что нелинейные потребители достаточно сильно искажают формы кривых тока и напряжения. Также было рассмотрено влияние высших гармоник на сеть.*

**Ключевые слова:** *качество электроэнергии; нелинейная нагрузка; несимметрия; высшие гармоники; коэффициент искажения.*

*In the article the question of quality of electricity networks office buildings. Studies have shown that consumers are quite nonlinear distorted waveform voltage and current. Also considered was the impact of higher harmonics on the network.*

**Keywords:** *quality of electricity; nonlinear load; asymmetry; harmonics; distortion factor.*

**Вступ.** Однією з найбільш актуальних проблем сучасного електропостачання є забезпечення якості електричної енергії (ЯЕ). Основною причиною погіршення ЯЕ стало широке поширення нелінійних навантажень, які при роботі створюють струми несинусоїдальної форми. Їх можна представити у вигляді суми гармонік, частоти яких кратні основній частоті живлячої мережі. Вищі гармоніки мають несприятливий вплив на роботу силового електрообладнання, пристроїв релейного захисту та автоматики, викликають прискорене старіння ізоляції [1, 2].

**Актуальність роботи.** Основним джерелом гармонійних спотворень є нелінійні навантаження потужних промислових споживачів. Також в останні роки відзначається значне погіршення ЯЕ в мережах комерційних і офісних споживачів – торговельних комплексів, адміністративних і офісних будівель, навчальних закладів. Нелінійним навантаженням таких споживачів є офісне

обладнання (персональні комп'ютери, сервери, принтери, блоки безперебійного живлення тощо), що використовує однофазні джерела живлення, а також регулюючі електроприводи систем кондиціонування і вентиляції. Освітлення виконується за допомогою люмінесцентних ламп з електронним баластом. У цієї групи споживачів частка нелінійного навантаження може значно перевищувати лінійну складову. Слід враховувати також неминучу несиметрію розподілу цих споживачів по фазах [3].

При несинусоїдальних струмах і напругах облік електричної енергії пов'язаний зі значними похибками. Особливо вплив вищих гармонік відзначається на індукційних лічильниках, що мають негативну частотну похибку на частотах вище 50 Гц (рис. 1) Залежно від того, містить електроприймач лінійне або нелінійне навантаження, можливий недооблік або переоблік спожитої електроенергії [4].

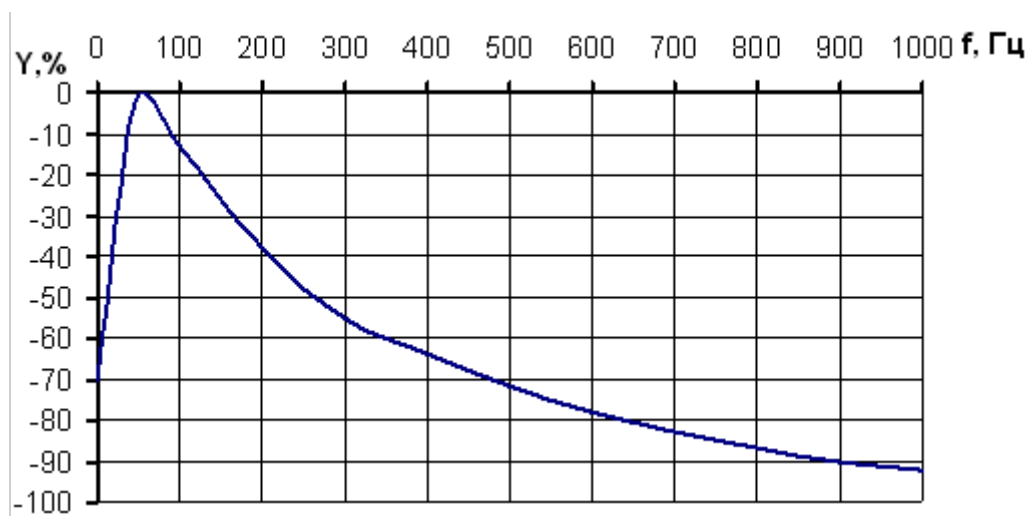


Рис. 1. Частотна характеристика індукційного лічильника

Оскільки нелінійні споживачі є генераторами вищих гармонік, то потужність, що ними споживається дорівнює:

$$P_{\text{НЛ}} = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n (1 + \gamma_n), \quad (1)$$

де  $P_1$  – потужність основної гармоніки;  $\sum_{n=2}^{\infty} P_n$  – потужність на частотах вищих гармонік;  $\gamma_n$  – частотна похибка лічильника на частоті  $n$ -ної гармоніки. Якщо навантаження лінійне, то потужність:

$$P_{\text{НЛ}} = P_1 - \sum_{n=2}^{\infty} P_n (1 + \gamma_n). \quad (2)$$

Таким чином, у випадку лінійних навантажень ми маємо недооблік електроенергії, а при нелінійних навантаженнях і живленні від джерела несинусоїдальної напруги має місце переоблік електроенергії. В цьому випадку виникають конфлікти і протиріччя між енергопостачальною компанією і споживачем при розрахунках останніх за спожиту електроенергію.

Будь-яка комплексна форма синусоїди може бути розкладена на складові частини, таким чином комплексна синусоїда це сума певної кількості парних і непарних гармонік з меншими чи більшими величинами

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=0}^n I_{km} \sin(k\omega + \varphi_k), \quad (3)$$

де  $I_0$  – постійна складова;  $I_{km} \sin(k\omega + \varphi_k)$  – гармоніки або гармонічні складові  $k$ -того порядку з амплітудою  $I_{km}$  і початковою фазою  $\varphi_k$ ;  $n$  – номер останньої вищої гармоніки, що враховується.

Погіршення якості електроенергії в міських розподільчих мережах характерно для більшості розвинених країн. Так, в оглядовій статті [2] наголошується, що рівень вищих гармонік напруги в електричних мережах японських міст перевищує межі, встановлені стандартом. В огляді [5] вищі гармоніки названі основною причиною погіршення якості електроенергії в електричних мережах Тайваню. Аналіз гармонійного складу струмів в розподільних мережах міста Белем (Бразилія), наведений у статті [6], показує, що рівень третьої та п'ятої гармонік в деяких випадках перевищує 20%. Автори статті відзначають, що найбільш високий рівень вищих гармонік характерний для розподільних мереж багатих кварталів, де використовується велика кількість побутових електронних пристроїв.

**Постановка задачі.** Очевидно, що подібні проблеми характерні і для електричних мереж України. В даній статті приведено результати вимірювань системи електропостачання типової офісної будівлі напругою 0,4 кВ, що живиться від двох трансформаторів потужністю 1000 кВА або 400 кВА. Вимірювання основних показників ЯЕ проводились за допомогою аналізатора ЯЕ SATEC-PM175. Прилад призначений для вимірювання і реєстрації показників ЯЕ згідно ГОСТ 13109-97, у складі різних інформаційно-вимірювальних систем на підприємствах, енергосистемах, а також для проведення робіт по енергоаудиту і атестації. Основні споживачі – офісне обладнання, системи освітлення, вентиляції і кондиціонування. Максимальне навантаження відбувається в період з 8:00 до 18:00.

**Результати досліджень.** За результатами досліджень отримані гармонійні складові струму у фазі А (рис. 2). Домінуючими є 1, 3 і 11 гармоніки. У нічний час відносний вміст вищих гармонік в спектрі струму вище, тому що основним навантаженням є чергове освітлення.

На рис. 3 показані залежності гармонік напруги. У спектрі напруги переважають 11 і 13 гармоніки. Проте їх величина не перевищує

значення, що визначається ГОСТ 13109-97.

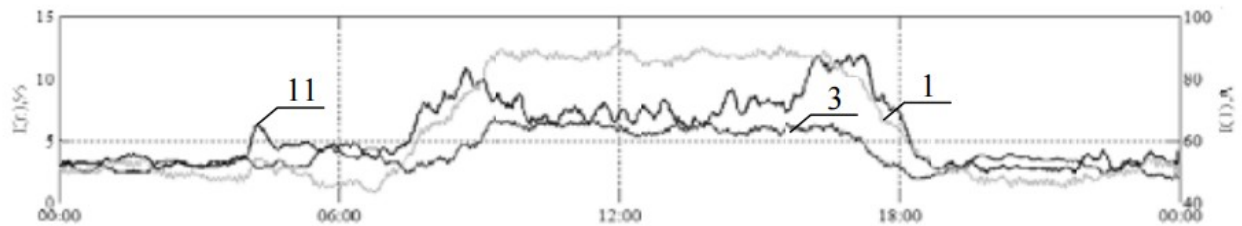


Рис. 2. Гармоніки струму в фазі А

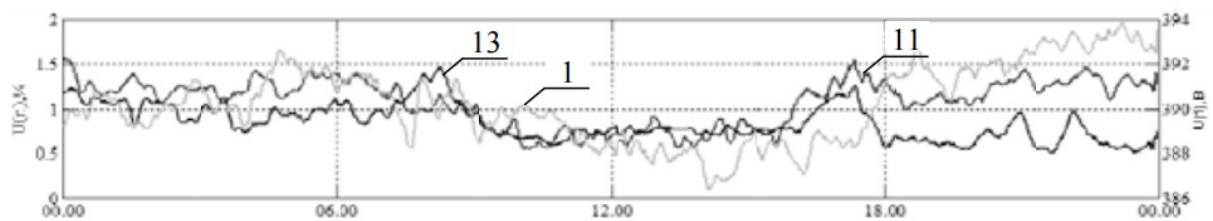


Рис. 3. Гармоніки напруги

У табл. 1 наведені відносні значення гармонійних складових струму і напруги. Значення коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривих струму і напруги наведено на рис. 4 і в табл. 2. Рівень гармонійних спотворень струмів досягає найбільших значень в робочий час. Це говорить про те, що основним нелінійним навантаженням є офісне обладнання та освітлення.

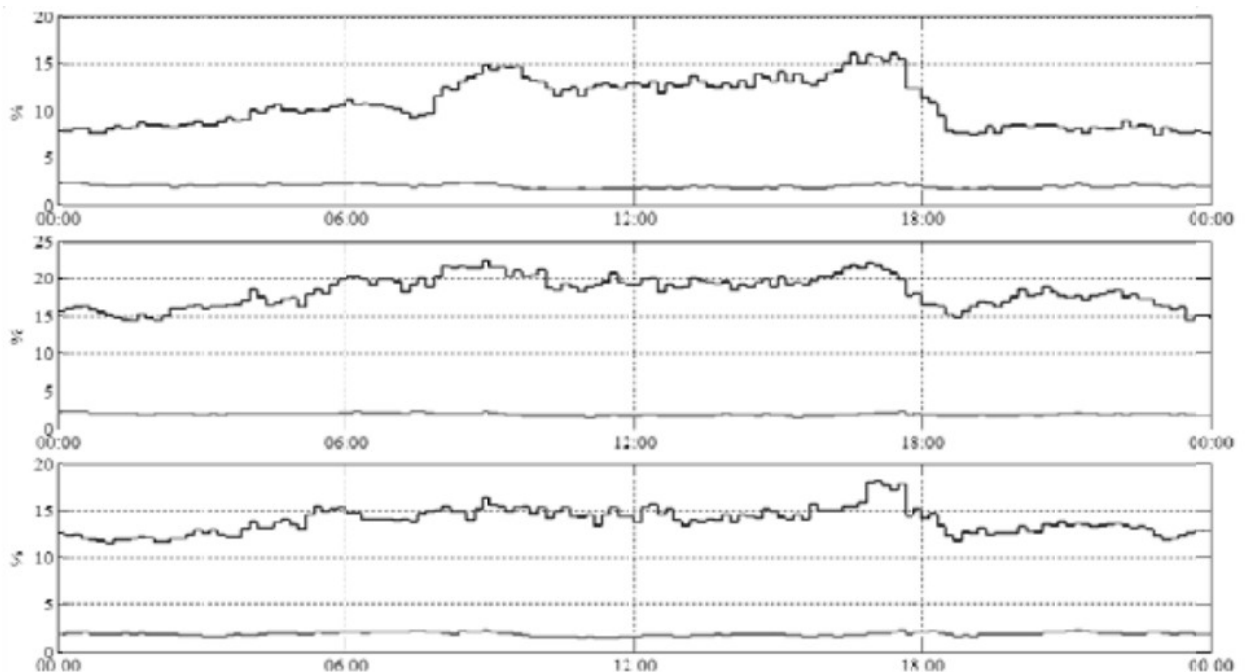


Рис. 4. Коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги і струму

Таблиця 1

Гармонічні складові струму і напруги у фазі А

Номер	Струм			Напруга		
	Мінімальний	Середній	Максимальний	Мінімальн а	Середня	Максимальн а
3	0,87	4,09	9,75	0,12	0,31	0,62
5	0,27	3,97	14,91	0,12	0,48	1,67
7	0,48	3,93	9,02	0,14	1,01	1,77
9	0,15	3,23	6,27	0,00	0,26	0,88
11	1,71	5,54	15,98	0,11	1,08	1,92
13	0,17	2,43	8,88	0,22	0,84	1,69
15	0,12	1,13	3,76	0,00	0,14	0,44

Таблиця 2

Коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих струму і напруги

Вимірювана величина	Результат вимірювання		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{Umin}, \%$	1,7	1,5	1,5
$K_U, \%$	1,99	1,86	1,82
$K_{Umax}, \%$	2,4	2,3	2,2
$K_{Imin}, \%$	7,4	14,4	11,5
$K_I, \%$	10,73	18,25	13,87
$K_{Imax}, \%$	16,0	22,3	18,1

### Висновки

Результати проведених досліджень показують, що проблема забезпечення якості електроенергії дуже актуальна для розподільчих мереж великих міст. Це підтверджується і дослідженнями інших авторів [6, 8, 9]. У мережах великих комерційних і офісних споживачів спостерігаються значні спотворення форми кривих струмів. У ряді випадків коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму перевищує 20%. Відзначимо, що вимірювання проводилися на кабельних вводах. У внутрішніх мережах будівель спотворення струмів і напруг значно вище. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми кривої струмів може перевищувати 100% [7, 8]. У цьому випадку втрати електроенергії у внутрішніх мережах здатні збільшуватися в 2-2,5 рази в порівнянні з синусоїдальним режимом.

Серйозну проблему представляють струми третьої гармоніки, що сумуються в нейтральних провідниках. Це призводить до збільшення втрат і в ряді випадків – до аварій, викликаних перегоранням нейтрального проводу.

Крім того, великі рівні струмів третьої гармоніки викликають додатковий нагрів обмоток трансформаторів, а також можуть викликати пошкодження їх ізоляції.

ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» встановлює допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги. Однак допустимі значення синусоїдальності кривої струму ГОСТ 13109-97 не нормує [10].

Для того щоб оцінити, наскільки великий рівень спотворення струмів, звернемося до міжнародних стандартів. У електротехнічній практиці часто використовують європейський стандарт EN 50160 і стандарт IEEE 519-1992. Ці стандарти визначають максимальні значення струмів непарних гармонік у відсотках до струму навантаження. Відповідно до стандарту IEEE 519-1992 [1] максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму залежить від відношення струму короткого замикання мережі в точці загального приєднання до струму навантаження. У разі потужної мережі ( $100 < L_{SC}/I_L < 1000$ ) максимальне значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої струму не повинно перевищувати 15%. Струми гармонік з порядковими номерами  $n < 11$  повинні бути менше 12% від струму навантаження  $I_L$ . Результати проведених вимірювань показують, що в більшості випадків коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму перевищує допустимі значення, що визначаються міжнародними стандартами.

Досвід показує, що найбільший ефект дає використання спеціальних компенсуючих пристроїв – активних і пасивних фільтрів гармонік. необхідне створення активно-адаптивних пристроїв, що забезпечують управління основними параметрами, визначаючими ефективність і якість електропостачання – коефіцієнта потужності, рівня гармонійних спотворень, дози Флікера та ін. Рішення перерахованих завдань буде сприяти підвищенню якості і надійності електропостачання в міських електричних мережах.

### Список використаних джерел

1. Куско, А. Якість енергії в електричних мережах [Текст] / А. Куско, М. Томпсон; пер. з англ. - М.: Додека-XXI, 2008. - 336 с.
2. Akagi H. [Text] // Proceedings of the IEEE. - Vol. 93, 2005. - No. 12. - P. 2128–2141.
3. Капустін, В.М. Комп'ютери та трифазна електрична мережа. Сучасні технології автоматизації [Текст] / В.М. Капустін, А.А. Лопухін // СТА. – 1997. - №2. - С. 104-108.
4. Влияние высших гармоник на электрооборудование: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/SIST\\_UPR\\_EP/METHOD/MONOG/frame/1\\_3.htm](http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/SIST_UPR_EP/METHOD/MONOG/frame/1_3.htm).
5. Hu C-H., Wu C-J., Chen Y-W. [Text] // IEEE trans. on Power delivery. - Vol. 12, 1997. - No. 3. - P. 1275–1281.
6. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. [Text] // IEEE transactions on power delivery. - Vol. 20, 2005. - No. 1.- P. 384–389.



7. Koval D., Carter C. [Text] // IEEE trans. on industry applications. - Vol.33, 1997. - No. 3. - P. 613–621.
8. Lai J.-S., Key T. [Text] // IEEE trans. on Industry Applications. - Vol.33, 1997. - No. 4. - P. 1104–1110.
9. Watson N., Scott T., Hirsch J. [Text] // IEEE transactions on power delivery. - Vol. 24, 2009. - No. 3. - P. 1521–1528.
10. ГОСТ 13109-97 Электрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення [Текст]. – Замінює ГОСТ 13109 – 87 - 1998. – М.: Госстандарт РФ, 1998. – 52 с.

*Стаття надійшла до редакції 28.03.2016 р.*

УДК 621.311

**В. П. Розен** , проф., **С.С. Великий**, студент (НТУУ «КПІ»)

### **ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЗМЕНШЕННЯ ТЕПЛОВИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИТРАТ В НАВЧАЛЬНИХ КОРПУСАХ**

---

**V. Rozen, S.Velykyi** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

### **DEFINITIONS OF KEY FACTORS THAT INFLUENCE ON REDUCING COSTS HEAT AND ELECTRICITY IN THE EDUCATIONAL BUILDING**

*У роботі розглянуто фактори які впливають на зменшення теплових та електричних витрат в навчальних корпусах, класифікація навчальних корпусів на класи по цим факторам. А також ранжування навчальних корпусів по відношенню до витрат енергії та фізичних параметрів для визначених класів.*

**Ключові слова:** бенчмаркінг; евклідова відстань; ієрархічна класифікація; ранжування; тони умовного палива.

*В работе рассмотрены факторы влияющие на уменьшение тепловых и электрических затрат в учебных корпусах, классификация учебных корпусов на классы по этим факторам. А также ранжирование учебных корпусов по отношению к затратам энергии и физических параметров для определенных классов.*

**Ключевые слова:** бенчмаркинг; евклидовое расстояние; иерархическая классификация; ранжирование; тона условного топлива.

*This article examines the factors that influence the reduction of thermal and electrical costs in educational buildings, classification of educational buildings into classes by these factors. As well as the ranking of the buildings relative to energy consumption and physical parameters for specific classes.*